

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 114 (1996)
Heft: 44

Artikel: Zwei CFK-Kabel für die Storchbrücke
Autor: Meier, Heinz / Meier, Urs / Brönnimann, Rolf
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-79069>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 06.02.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Heinz Meier, Urs Meier und Rolf Brönnimann, Dübendorf

Zwei CFK-Kabel für die Storchenbrücke

Weltweit erstmals wurden auf einer durch Fahrzeuge hoch belasteten Schrägseilbrücke, der neu erstellten Storchenbrücke in Winterthur, zwei Schrägkabel aus kohlenstoffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) eingebaut. Dieses Material ist bekannt aus Luft- und Raumfahrt, im Bauwesen jedoch relativ neu, wo es erst seit 1991 für nachträgliche Verstärkungen eingesetzt wird. Es zeichnet sich durch sehr gute Korrosionsbeständigkeit, ausgezeichnetes Ermüdungsverhalten und eine geringe Rohdichte aus.

Fachleute sind sich seit mindestens zehn Jahren bewusst, dass die bisher eingesetzten Stahlkabel den hohen Anforderungen bei Schrägseilbrücken in vielen Fällen nicht genügen. Bei den Hängerkabeln klassischer Hängebrücken ist die Situation ähnlich, wie die von der University of Texas in Austin, USA, 1995 weltweit durchgeführte Erhebung [1] zeigt. Die Ergebnisse dieser Studie besagen, dass einerseits bezüglich Leistungsfähigkeit den Paralleldraht- und Litzenbündeln die grösste Bedeutung zugemessen wird, andererseits deren Dauerhaftigkeit und Ermüdungsverhalten aber im Vordergrund stehen.

Aufgrund einer eigenen Beurteilung [2] wurde bereits in den frühen achtziger Jahren vorgeschlagen, kohlenstoffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) als Kabelwerkstoff einzusetzen. Diese modernen Werkstoffe versprechen ein sehr hohes Zukunftspotential: Ein CFK-Kabel wiegt bei gleicher Bruchlast rund achtmal weniger als ein Stahlkabel, was sich unter anderem im besseren ideellen Modul äussert. Wenn

ein Schrägkabel belastet wird, steht infolge des durch die Eigenlast bedingten Durchhangs des Kabels nicht der eigentliche Elastizitätsmodul zur Verfügung, sondern der sogenannte ideale oder scheinbare Modul. Bei grossen Spannweiten weisen diesbezüglich CFK im Vergleich zu Stahlkabeln deutliche Vorteile auf (Bild 1).

Da auch die Festigkeit der CFK-Kabel 60% höher ist, können die Kabelquerschnitte markant reduziert werden. Die Steifigkeit in Längsrichtung ist jedoch etwas geringer als bei Stahl, so dass dieser Vorteil nicht immer auswertbar ist. Das CFK-Kabel ist korrosionsbeständig, sein Temperaturausdehnungskoeffizient ist beinahe Null, die Längenänderungen bei Temperaturextrema sind somit sehr gering. Trotzdem scheint auf den ersten Blick ein wirtschaftlicher Einsatz nur beim Auftreten mehrerer dieser Vorteile möglich. Wenn jedoch die totalen Kabelkosten über die gesamte Lebensdauer eines Bauwerks aufsummiert werden, dann schneiden die CFK-Kabel deutlich besser ab.

Warum gerade die Storchenbrücke?

Als 1994 das neuentwickelte Verankerungssystem zuverlässig genug erschien, wurde nach einem attraktiven Objekt für den weltweit erstmaligen Einsatz dieser CFK-Kabel gesucht. Es sollte sich dabei jedoch nicht nur um eine Fussgänger-, sondern um eine durch Strassenverkehr hoch belastete Brücke handeln. Eine neu zu bauende Schrägseilbrücke, die Storchenbrücke, war in Winterthur in Planung, und so kam man mit dem Bauherrn, der Stadt Winterthur, ins Gespräch.

Es wurde entschieden, bei dieser Weltpremiere vorerst einmal zwei der Stahlkabel durch CFK-Kabel zu ersetzen. Bis vor kurzem dachte man kaum daran, eine Brücke nur teilweise so auszurüsten, denn das Problem der Differenz der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Stahl und CFK in Längsrichtung schien ein zu grosses Hindernis zu sein, da die beiden Werte sich um den Faktor 50 unterscheiden. Diesbezüglich ist das Konzept der Storchenbrücke günstig, da es sich bei der Brückenplatte nicht um einen hochsteifen Stahlbetonkasten, sondern um eine relativ weiche Verbundkonstruktion eines Stahlträgerrostes mit Betonplatte handelt, so dass sich die unterschiedlichen Längsausdehnungen der Kabel lediglich als geringe Laständerungen der Kabel und als zulässige Verformungen der Fahrbahnplatte äussern.

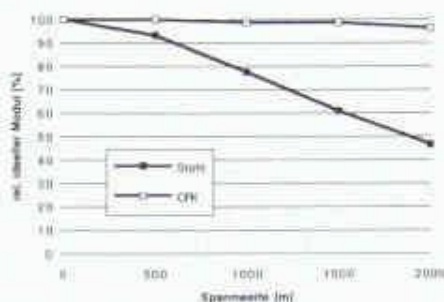
Die gegenseitige Beeinflussung der unterschiedlichen Kabelmaterialien für verschiedenste Lastfälle wurden für die Storchenbrücke durch das projektierende Ingenieurbüro berechnet. Im Winter entlasten die Stahlkabel bei einer Abkühlung um 25°C die CFK-Kabel um max. 10%, und die Fahrbahnplatte im Bereich der CFK-Kabel liegt um rund 8 mm tiefer, als wenn Stahlkabel eingebaut wären. Das Ganze gilt umgekehrt bei einer Erwärmung um 25°C. Da die CFK-Kabel mit genügender Sicherheit dimensioniert sind, führt diese saisonal bedingte Mehrbelastung im Sommer nicht zu einer kritischen Belastung.

Herstellung der CFK-Drähte

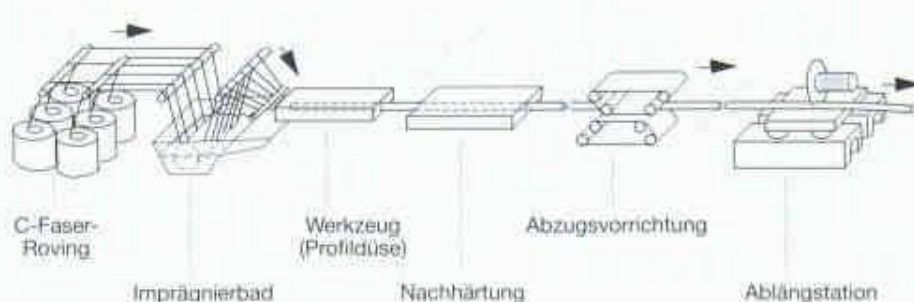
Die Eigenschaften von CFK sowie die Herstellung der Kohlenstoffasern sind in [3] ausführlich beschrieben. Es soll hier nur noch auf die Herstellung der Drähte eingegangen werden.

Da die Kohlenstoffasern nur in ihrer Längsrichtung sehr hohe Zugfestigkeiten aufweisen, ist es sinnvoll, sie im Zugglied ausschliesslich in dieser Richtung anzuordnen. Um einigermaßen mit den tiefen

1
Relative ideale Moduln in % von Paralleldrahtbündeln aus Stahl und CFK



2
Verfahrensschritte der Strangziehanlage



Durchmesser [mm]	5.03
Zugfestigkeit σ_{ti} (längs) [N/mm ²]	3300
Bruchlast [kN]	65.0
Elastizitätsmodul E (längs) [N/mm ²]	162 000
Bruchdehnung [%]	1.75
Robdichte [g/cm ³]	1.62
Faservolumenanteil [%]	73.6
Wärmeausdehnungskoeffizient (längs) [m/m/°C]	0.2×10^{-6}

3

Eigenschaften der verwendeten CFK-Drähte

Preisen des Stahls konkurrieren zu können, ist ein einfaches, weitgehend automatisiertes und somit kostengünstiges Verfahren erforderlich. Dieses Verfahren, mit dem solche sogenannten unidirektional verstärkten Bauteile hergestellt werden, ist das Strangziehverfahren (Pultrusion).

Das Prinzip des Strangziehverfahrens ist mit dem kontinuierlichen Pressen vergleichbar. Ausgangsmaterialien sind Kohlenstoffasern - Rovings (Stränge aus Tausenden von Elementarfasern mit einem Durchmesser von 5 bis 8 μm mit einem Kohlenstoffanteil von 92 bis 99.99%) und ein flüssiger Kunststoff, das Matrixmaterial. Es werden dabei Dutzende von z. B. 12-k-Rovings (12 000 Elementarfasern) parallel durch ein Imprägnierbad gezogen, in einer beheizten Form zu Drähten geformt und anschliessend gehärtet. Dank dieser Methode ist es möglich, nahezu endlose Profile herzustellen. Erreichbare Prozessgeschwindigkeiten liegen je nach verwendeter Matrix im Bereich von 0.1 bis 3 Metern pro Minute. Die maximalen Längen sind abhängig von der verwendeten Grösse der Rovingspule bzw. den späteren Transportmöglichkeiten. Diese Drähte sind nun unidirektional verstärkt, die mechanischen Eigenschaften proportional zu den Fasereigenschaften sind damit sehr hoch. In Querrichtung werden sie von den verwendeten Matrixsystemen dominiert.

Die Rovingspulen sind auf einem Spulenständer aufgesteckt. Die einzelnen Rovings werden durch mehrere ringförmige Keramikösen zum Tränkbad geführt, wo die Fasern mit niedrigviskosem Matrixmaterial benetzt werden. Im daran anschliessenden teilbaren Werkzeug aus Stahl wird den Rovings mittels einer Düse das gewünschte Profil vorgegeben. Die Innenfläche dieser Form ist poliert und verchromt, um die Reibungswerte beim Durchlauf möglichst gering zu halten. Die Form ist beheizt, um den Matrixwerkstoff auszuhärten. Nach dem Verlassen des Werkzeugs hat der Draht bereits das gewünschte Profil, es folgt aber noch ein Nachtempern im Heissluftstrom, was eine Zunahme der mechanischen Eigenschaften, insbesondere der interlaminaeren Scherfestigkeit, bewirkt. Zum Aufbringen der Abzugskraft dienen meist Gummirauf-

pen oder hintereinander angeordnete, hydraulisch betätigte Klemmen. Der letzte Teil der Anlage besteht aus einer Aufroll- und/oder einer Trennvorrichtung.

Die Drähte für die Kabel der Storchbrücke wurden mit einem Durchmesser von 5 mm hergestellt. Sie bestehen aus 400 000 einzelnen Fasern und wurden bereits im Werk auf ihre definitive Länge von etwa 35 Metern abgelängt und in Bündeln zu jeweils 10 Stück auf Rollen mit 2 m Durchmesser geliefert. Sie bestehen aus Fasern japanischer Herkunft mit einer Festigkeit von 4800 und einem Längsmodul von 230 000 N/mm². Die Drahtigenschaften sind in Bild 3 dargestellt.

Aufbau von Kabel und Verankerungen

Schweizer Firmen haben auf dem Gebiet der Stahlkabel seit Jahrzehnten grosse Erfahrung. 1969 erhielt die Empa Dübendorf den Auftrag, neuartige Paralleldrahtbündel aus Stahl für eine Schrägseilbrücke in Mannheim und für das Olympiastadion in München zu untersuchen. Aufbauend auf grossem interdisziplinärem Wissen begann man zu Beginn der 80er Jahre auch mit der Planung und dem Bau von CFK-Kabeln. Es ging dabei nicht darum, die eigentlichen Zugglieder zu entwickeln, sondern die Verankerungen dafür. Die Kabel werden wie bei Verwendung von Stahl als Paralleldrahtbündel ausgebildet. Die Verankerungen sollen höher belastbar sein als das Zugglied. Die Traglast des Bündels soll das theoretische Maximum von 94% der Summe der Traglasten der Einzeldrähte erreichen, und der Bruch soll auf freier Strecke erfolgen.

Kohlenstoffasern haben nebst ihren grossartigen Eigenschaften [4] auch einen Nachteil: die Verankerung der Fasern. Der Grund dafür ist die extreme Anisotropie, so dass die aussergewöhnlichen mechanischen Eigenschaften in der Regel nur in Axialrichtung gelten. Die grosse Schwäche ist die geringe Querdrukfestigkeit der Fasern, die schon bei vergleichsweise bescheidenen Querkraften zu Faserbrüchen führen kann. Somit ist es erforderlich, die CFK-Drähte äusserst sorgfältig zu behandeln.

Das entwickelte Verankerungssystem besteht aus einer Stahlhülse mit konischer Innenform und einem zwischen Stahlhülse und CFK-Drähten liegenden Anker aus einer Vergussmasse, die für die Übertragung der Kräfte von den Drähten auf die Hülse verantwortlich ist. Die Drähte werden parallel in die Hülse geführt, jedoch nicht aufgespleisst. Die Vergussmasse muss folgenden Anforderungen genügen:

Carbonkabel: Achtmal leichter als Spannstahl bei gleicher Bruchlast!

Dass die Kunststoffkabel zudem korrosions- und ermüdungsbeständig sind, lässt - trotz (noch) hohem Preis - ein beträchtliches Marktpotential erwarten. In den folgenden Bereichen könnten ihre Vorteile schon bald voll zum Tragen kommen:

Brückenbau

Die neuen Kabel sind für Schrägseil- und Hängerkabel von Bogen- und Hängebrücken geeignet (gerade Kabel).

In aggressiven Umgebungen wie Meerengen mit Salzwassergischt, Industriegebieten mit stark verschmutzter Luft oder bei Streusalzsprühnebeln einwirkung kann sich der Einsatz von Carbonkabeln lohnen, da diese eine höhere Lebensdauer haben und zudem wartungsfrei sind. Ein dünnwandiges Hüllrohr genügt für den Schutz vor UV-Strahlung, eine Injektion ist nicht notwendig.

In Japan wird eine Umstellung auf Carbonkabel für die vertikalen Hängerkabel von Hängebrücken in naher Zukunft erwartet, da diese extrem ermüdungsbeansprucht und korrosionsgefährdet sind.

In fernerer Zukunft wird die Carbontechnologie den Bau von Hängebrücken mit bisher nicht realisierbaren Spannweiten ermöglichen (Meerengen von Gibraltar, Messina), da das Verhältnis von Eigengewicht zu Nutzlast stark verbessert wird. Carbonabspannungen können dank minimalem Gewicht mit sehr geringem Durchhang realisiert werden. Bei längeren Schrägseilen wirkt sich das positiv auf die Seilelastizität aus, da diese durch den Durchhang stark reduziert wird (scheinbarer E-Modul). Das Handling der Kabel wird durch das niedrige Gewicht stark erleichtert.

Um weitere Erfahrungen zu sammeln, bietet sich im Moment der Einsatz von Carbonkabeln bei Fussgängerbrücken an (kleine Lasten, leichte Kabel).

Abspannungen

Einen interessanten Vorteil bieten die Carbonkabel bei der Abspannung von Sendemasten: Im Gegensatz zu Stahlkabeln stören sie das elektromagnetische Feld nicht, wodurch die Sendeleistung nicht beeinträchtigt wird. Auch für Dachabspannungen können Carbonkabel aus Handling- und Unterhaltsgründen in Frage kommen.

Meeresbauten

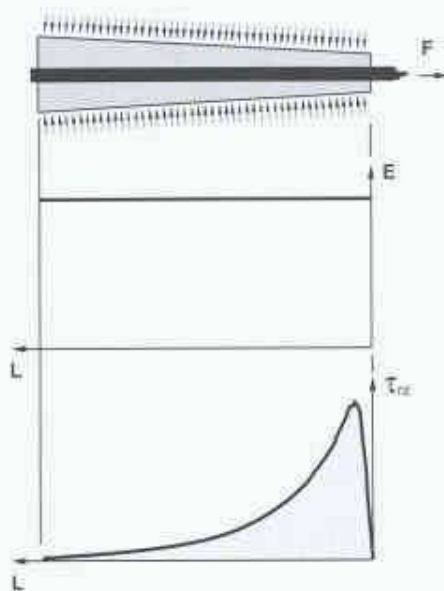
Ein grosses Potential liegt in den Unterseeanwendungen: Die Korrosionsbeständigkeit und die hohe Festigkeit prädestinieren das Carbonkabel geradezu für die Abspannung von Bohrplattformen, Schwimmbrücken und Unterwassertunnels!

Andere Anwendungen von Carbonfasern im Bauwesen

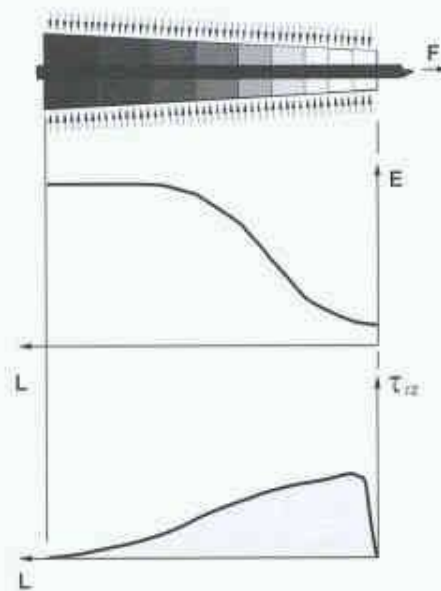
- Nachträgliche Verstärkung von Bauwerken mit CFK-Lamellen
- Schubverstärkung von Brückenpfeilern in seismisch aktiven Gebieten durch Umwickeln mit Carbonfasern

Für hochbeanspruchte Spezialteile dürften im Bauwesen in Zukunft vermehrt Carbonprodukte eingesetzt werden.

Pascal Klein, Bureau BBR Ltd., Zürich



4
a: Verankerungskonzept ohne Abstufung des E-Moduls



b: Verankerungskonzept mit kontinuierlicher Abstufung des E-Moduls

Die Lastübertragung darf die Langzeiteigenschaften des Kabels bezüglich Festigkeit und Ermüdung nicht beeinträchtigen, und es darf keine galvanische Korrosion zwischen den CFK-Drähten und den zur Zeit noch metallischen Hüllen entstehen. Deshalb muss die Vergussmasse ein Isolator sein. Die konische Innenform der Hülse gewährleistet die zur Erhöhung der interlaminaeren Scherfestigkeit erforderlichen Radialspannungen.

Das Konzept der Verankerung wird in Bild 4 am Beispiel eines Einzeldrahts dargestellt. Bestünde die Vergussmasse über die gesamte Verankerungslänge aus einem hochgradig gefüllten Epoxidharz, würden an der Oberfläche des Drahts beim Eintritt in die Verankerung hohe Schubspannungsspitzen auftreten (Bild 4a). Diese würden entweder eine Delamination des Drahts an der Oberfläche und schliesslich ein Ausziehen desselben oder, falls zusätzlich noch übermässige Radialspannungen

an der gleichen Stelle einwirken, zu einem vorzeitigen Zugversagen führen. Diese Situation könnte verhindert werden, indem als Vergussmasse ein reines Epoxidharz mit einem relativ geringen Modul eingesetzt würde. Kurzfristig gesehen wäre diese Variante erfolgreich, langfristig wäre unter Kriechbeanspruchung jedoch mit einem Zeitstandsversagen zu rechnen.

Der erfolgreiche Lösungsansatz ist in Bild 4b dargestellt. Als Vergussmasse wird ein Gradientenwerkstoff eingesetzt. Beim Eintritt des CFK-Drahts in die Verankerung ist der Elastizitätsmodul der Vergussmasse gering und nimmt kontinuierlich zu. Gegen die Mitte der Verankerung erreicht er das Maximum und bleibt bis zum Ende der Hülse konstant, womit Spannungsspitzen vermieden werden. Umfangreiche, an der Empa durchgeführte Versuche haben gezeigt, dass in der Regel ein kontinuierlicher Übergang durch wirtschaftliche fünf bis sieben Abstufungen des Mo-

duls ersetzt werden kann. Für die Verankerungen der CFK-Kabel der Storchenbrücke wurde denn auch ein Aufbau mit sieben Abstufungen des E-Moduls gewählt.

Der Aufbau des eigentlichen Gradientenmaterials besteht immer aus demselben Kern aus Aluminiumoxidgranulat mit einem Durchmesser von rund 2 mm sowie aus Epoxidharz. Um eine reduzierte Drucksteifigkeit zu erhalten, werden diese Kerne je nach gewünschtem Modul mit einer dünneren oder dickeren Schicht Epoxidharz beschichtet. Der maximale Modul wird durch Verwendung von unbeschichtetem Granulat erreicht. Die verbleibenden Zwischenräume zwischen den Granulatkörnern werden schliesslich mit einem Epoxid-Giessharz verfüllt. Dieses Verankerungssystem wurde unter der Nummer CH 01 270/94-3 patentiert.

Bauteilversuche

Schon in den frühen 80er Jahren wurden Versuche unternommen, einzelne CFK-Drähte mit \varnothing 6 mm so einzuspannen, dass der Bruch auf freier Strecke auftrat. Damals wurde noch mit einem Drahtmaterial mit einer vergleichsweise tiefen Zugfestigkeit von 1700 N/mm² gearbeitet. Aus 19 solchen Drähten bestehende Kabel wurden statischen und schwingenden Beanspruchungen unterworfen. Die Versuche demonstrierten eine sehr hohe Zuverlässigkeit des Verankerungssystems. Unter statischer Beanspruchung konnten 94% der Summe der Traglast der Einzeldrähte (und damit die theoretische Obergrenze) erreicht werden. Die Schwingversuche bewiesen die hervorragenden Ermüdungseigenschaften von CFK: Schwingbreiten von 900 N/mm² wurden problemlos über zwei Millionen Lastspiele bewältigt.

Der nächste Schritt erfolgte anfangs der 90er Jahre, als man begann, mit dem auch für die Storchenbrücke verwendeten Drahtmaterial mit Zugfestigkeiten bis 3500 N/mm² zu arbeiten. Es wurden zunächst auch wieder Drähte mit \varnothing 6 mm, später solche mit \varnothing 5 mm verwendet. Nach langwierigen Untersuchungen an Einzeldrähten wurden erste Kabel mit 7, dann mit 19 und 37 Drähten gebaut. Die aktuellsten und grössten Kabel bestehen aus 241 Drähten. Eine weitere Serie werden Kabel mit 61 Drähten und einer erwarteten Bruchlast von rund 3500 kN darstellen.

Die statischen Versuche zeigen folgendes Bild: Die Werte bei 7er und 19er-Kabeln erreichten auch hier die theoretische Obergrenze nahezu vollständig. Bild 5 zeigt die Resultate eines Ermüdungsversuchs mit einer Frequenz von 4.4

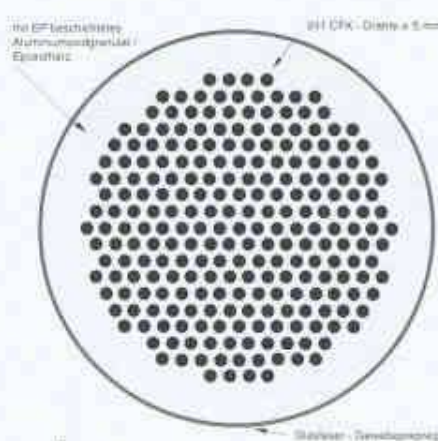
5
Lasten und Lastspiele Ermüdungsversuche am Kabel mit 241 Drähten

Last [kN]	Zugspannungen im CFK [N/mm ²]	Anzahl Lastspiele [-]	Vielfaches der Gebrauchslast [-]
Oberlast 2330	480	1,981 Mio.	1,08
Unterklast 1235	260		
Mittellast 1785	370		
Oberlast 4200	880	9,172 Mio.	2,18
Unterklast 3000	630		
Mittellast 5600	750		
Oberlast 6500	1350	10,602 Mio.	3,55
Unterklast 5200	1080		
Mittellast 5850	1220		

H_z an einem Kabel aus 241 Drähten. Das Kabel entspricht, abgesehen von der freien Länge von nur 5,35 m, den beiden Kabeln für die Störchenbrücke. Während der gesamten Dauer der Versuche über mehrere Wochen traten keinerlei Probleme auf.

Herstellung der CFK-Kabel

Für die Kabel der Störchenbrücke wurde ein Querschnitt aus 241 CFK-Drähten à 5 mm Durchmesser gewählt. Er ist hexagonal aufgebaut, mit 6×4 zusätzlichen Drähten an der Peripherie (Bild 6). Um die Drähte in eine zueinander korrekte Position zu bringen, wurden sie zuerst als zwei Haufen auf einen 37 m langen Hilfstisch gelegt. Dann wurden die Enden der einen Seite in vier 5 mm dünne Lochscheiben aus GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff) mit 241 Bohrungen von je 5,4 mm eingefädelt. Ihr Aussendurchmesser war etwas kleiner als der lastseitige Konusdurchmesser der Stahlhülse. Zwei dieser Scheiben wurden dann über die ganze Kabellänge verschoben. Dies bot Gewähr dafür, dass sich auf der gesamten Länge keine Drahtkreuzungen befinden konnten. Die Drahtenden wurden anschliessend auf rund einem Meter Länge sorgfältig mit einem acetongetränkten Lappen gereinigt, da später der Zugang zu den inneren Drähten nicht mehr möglich war. Das nachfolgende Befestigen der GFK-Endplatten an den beiden Kabelenden hatte zwei Gründe: Einerseits musste sichergestellt werden, dass die vom Ingenieur berechnete Kabellänge genau eingehalten werden konnte, andererseits bot das Verbinden der Drahtenden Gewähr dafür, dass beim späteren Umlenken des ganzen Kabels nicht einzelne Drähte aus ihrer Position schlüpfen konnten. Die 30 mm dicke Platte hat den gleichen Aussendurchmesser wie die Lochscheiben und enthält auch 241 je 20 mm tiefe Bohrungen zu 5,4 mm. Sie wurden nun mit Hilfe einer Spritze mit einem hochwertigen Epoxidharzklebstoff zu einem Teil gefüllt und gleich an den Bohrungswandungen verteilt. Parallel dazu wurden die Drahtenden mit einem Spezialwerkzeug auf etwas mehr als Bohrungstiefe imprägniert. Diese für den weiteren Verlauf enorm wichtigen Arbeiten hatten innerhalb einer halben Stunde zu erfolgen, da ansonsten der Klebstoff in den Bohrungen bereits reagiert hätte. Die Drahtenden wurden nun sorgfältig in die Platte eingefahren. Der 20 mm grosse Abstand Endplatte - erste Lochscheibe wurde später noch zusätzlich mit einem Epoxid-Giessharz verfüllt. Somit stand auf beiden Kabelenden eine Verankerungslänge von

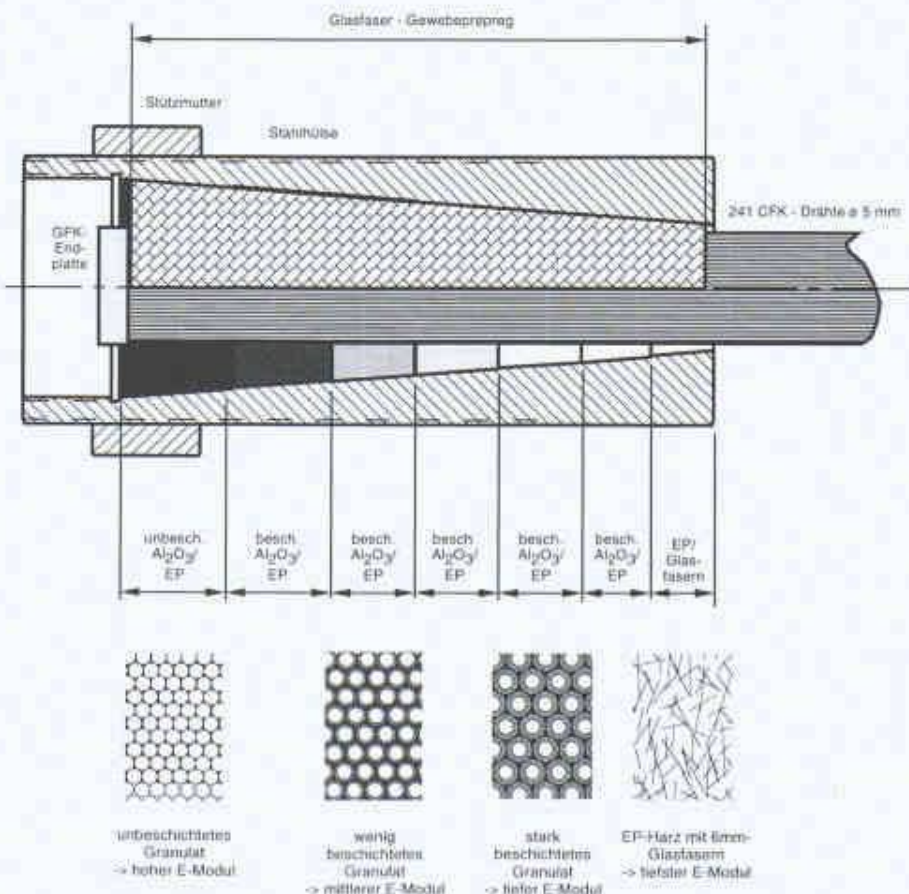


6 Querschnitt durch die Verankerung der CFK-Kabel

je 40 mm zur Verfügung. Die zweite Lochscheibe wurde in einem Abstand von 200 mm an den Drähten befestigt.

Der entstandene Kabelaussendurchmesser war nun um einiges geringer als der Innendurchmesser des später das Kabel schützenden Hüllrohrs. Der noch verbleibende Zwischenraum wurde mit zwei Meter langen Schalen aus einem Polyäthylen-Schaum gefüllt. Nach einer Schale wurde das Kabel jeweils mit einer Bandage aus einem Stollenband und Kabelbri-

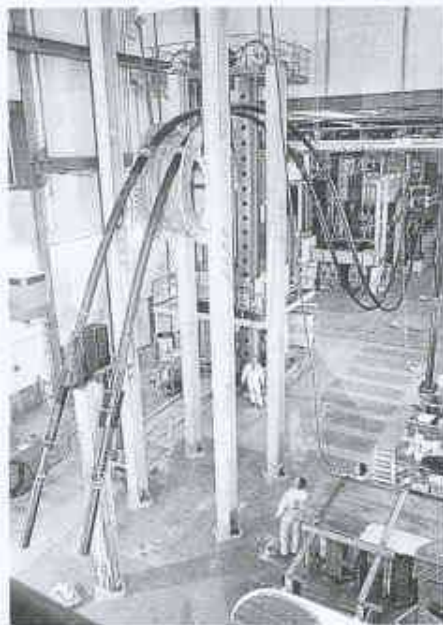
7 Längsschnitt durch die Verankerung der CFK-Kabel.



den zu einem möglichst engen Durchmesser kompaktiert. Diese Umhüllung soll im Betrieb das Schlagen des Hüllrohrs an das Kabel vermeiden. Nun konnte, immer noch im horizontalen Zustand, das Aufziehen und Positionieren des Polyäthylen-Hüllrohrs erfolgen. Gleichzeitig wurden die vorbereiteten Teleskoprohre provisorisch befestigt.

Bevor die Stahlhülse über das Kabelende gehoben wurde, erfolgte nochmals ein Entfetten ohne mechanische Einwirkung der CFK-Drähte in einem mit Aceton gefüllten Rohr. Die Stahlhülse wurde aus Isolationsgründen und als Rissstopper mit einem Glasfasergewebeprepp ausgelegt.

Nun konnte das Füllen der Stahlhülse mit dem Gradientenwerkstoff auf der lastseitigen Seite der Hülse in einzelnen Schichten (Bild 7) erfolgen. Ein Komprimieren oder Vibrieren der Granulate ist nicht notwendig. Das so vorbereitete Kabelende samt gefüllter Stahlhülse wurde nun auf 80°C vorgeheizt, um das Fließen des Giessharzes auch nach 600 mm Ankerlänge zu gewährleisten. Das Giessharz besteht aus vier Komponenten und wurde nach dem Mischen ebenfalls leicht vorgewärmt, um eine niedrige Viskosität zu erreichen und gleichzeitig die beim Mischen



8

Umlenken des Kabelendes als Vorbereitung für den Verguss

eintretende Luft zu verdrängen. Nachdem auch die oberste Schicht (Gießharz mit 6 mm-Glasfaserschnitzeln) eingebracht war, konnte das Aushärten der nun fertigen Verankerung bei 80 und 120°C erfolgen. Bei diesen Temperaturen härtete auch das eingelegte Glasfasergewebeprepreg und verband sich mit dem Gießharz.

Nach dem Entfernen des Ofens konnte am einen Kabelende (später pylonsseitig) bereits das Teleskoprohr samt Flachdichtung an die Stahlhülse geschraubt werden und auch das Verschweissen des Teleskoprohrs mit dem Hüllrohr erfolgen. Das zweite Kabelende (später fahrbahnseitig) blieb nach dem Vergiessen offen, so dass die verschiedenen Messeinrichtungen noch angebracht werden konnten.

9

Einfüllen der Glasfaserschnitzel in die Stahlhülse



Transport und Einbau

Die beiden Kabel wurden auf zwei SBB-Flachwagen bis direkt unter die Baustelle transportiert. Der Einbau der Kabel erfolgte nach den ersten fünf Stahlkabeln. Zuerst mussten sie mit dem Baustellenkran von den Eisenbahnwagen auf die behelfsmässigen Holzplanken an Stelle der späteren Brückenplatte gehoben werden. Beim Anheben hingten die beiden Verankerungen schlaff nach unten. Die dabei unter torsionsloser Vorräussetzung auftretenden Spannungen in den Randfasern betragen 500 N/mm².

Nachdem die beiden Kabel auf der Brücke abgelegt waren, wurden die Verankerungen für den Einbau vorbereitet und die notwendigen Hilfsvorrichtungen angebracht. Der weitere Einbau erfolgte gleich wie bei den kurzen Stahlkabeln: Das obere Kabelende wurde mit dem Baustellenkran mit einer Umlenkstruktur bis in die zugehörige Öffnung im Pylon gezogen und dort provisorisch fixiert. Dann wurden die unteren Stahlhülsen mittels Winden in die richtige Lage über das fahrbahnseitige Rohr gebracht und schliesslich in dieses abgesenkt. Nach Erreichen der vorausgerechneten Lage wurde die zugehörige Stützmutter eingeschraubt, auf die Ankerplatte gestellt und somit die Kabelposition in der einen Richtung fixiert. Das gleiche Prozedere erfolgte mit der oberen Verankerung. Der Einbau erfolgte problemlos und die vorausgerechneten Endlagen wurden bei beiden Kabeln erreicht.

Schutz der Kabel

Obwohl ein Korrosionsschutz der CFK-Kabel nicht notwendig ist, war vom Bauherrn ein Polyäthylenhüllrohr vorgeschrieben. Es sollte sich aus optischen

Gründen um das gleiche Produkt handeln wie beim Schutzrohr für die Stahlkabel. Bei künftigen Anwendungen wird dieses Polyäthylenrohr durch dünnere, leichtere Lösungen ersetzt, z.B. durch Schrumpfschläuche, wie sie aus der Elektro- und Elektronikbranche bekannt sind. Dies würde gleichzeitig das Gewicht des Kabels pro Laufmeter (CFK-Zugglied alleine: 7 kg/m) weiter senken. Nach Abschluss aller Arbeiten wurden die Teleskoprohre in Richtung der Verankerungen geschoben und mit den korrosionsgeschützten Stahlhülsen verschraubt. Auf der später oben hängenden Seite wurde das Teleskoprohr mit dem 0.75 Meter überlappenden mittleren Hüllrohr verschweisst. Der Schutz gegen Blitzeinschlag in die bedingt elektrisch leitfähigen CFK-Kabel erfolgte mittels Erdung der über den Stahlhülsen montierten Schutzhauben an den Pylon.

Langzeitmessungen

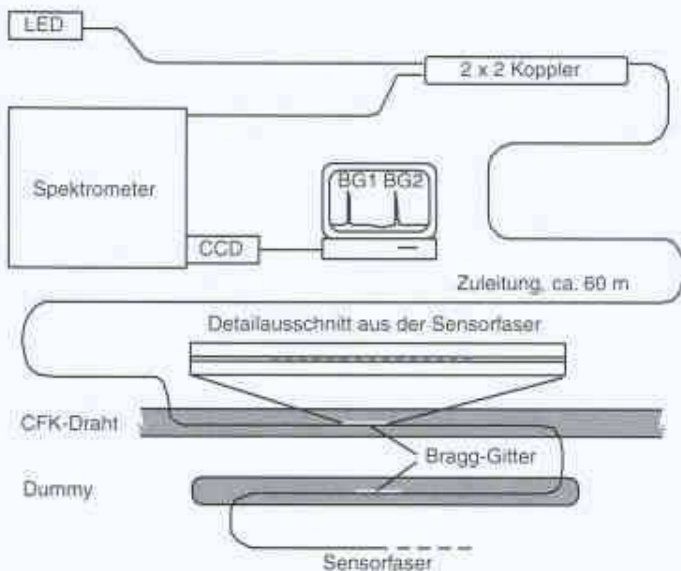
Um im Langzeitbetrieb verlässliche Daten über die Kabellasten und den generellen Kabelzustand zu erhalten, wurden verschiedene Messsonden in die Kabel eingebaut. Die Kabellasten werden über eine Dehnungsmessung an den CFK-Drähten ermittelt. Dazu wurden einerseits vor der Montage gleichmässig am Umfang verteilte Dehnungsmessstreifen (DMS) appliziert. Durch eine statische Kalibration sowie Klimatests mit dem gleichen Material ergibt sich eine zuverlässige Kraftmessmethode. Im Bereich der DMS sind jeweils Temperatur- und Feuchtesensoren angebracht, die Auskunft über die klimatischen Verhältnisse im verschweissten Hüllrohr geben.

Ein Novum in der Messtechnik ist der Einsatz von optischen Fasern als Sensoren.

10

Aufbringen von Sensoren für die Langzeitmessungen





11
Aufbau des faseroptischen Messsystems

Sie dienen ebenfalls der Lastmessung. In Bild 8 ist das Messprinzip schematisch dargestellt: Die Strahlung einer Leuchtdiode (LED) wird in eine Monomode-Faser eingekoppelt und gelangt über einen Koppler und ein Zuleitungskabel in die Sensorfaser im Tragkabel. Die Sensorfaser enthält sieben Sensorbereiche von 6 mm Länge, wovon zwei in der Figur durch die hellen Stellen auf den CFK-Drähten angedeutet sind. Der Detailausschnitt veranschaulicht das Funktionsprinzip der Sensoren. In aktiven Bereichen, den sogenannten Bragg-Gittern, ist der optische Brechungsindex periodisch moduliert. Nur der Teil der eingekoppelten Strahlung, dessen Wellenlänge mit dem Gitter zusammenpasst, wird reflektiert.

Jedes der Bragg-Gitter reflektiert nun eine andere Wellenlänge und ist damit identifizierbar. Die reflektierte Strahlung gelangt über den Koppler in ein Spektrometer mit einer CCD-Zeilenkamera. Die Zeilenkamera wird mit dem Computer ausgelesen, und man erhält damit das Spektrum der reflektierten Strahlung. Jedes Bragg-Gitter wird nun als Peak im Spektrum sichtbar. Wird der CFK-Draht belastet, dehnt sich auch das Gitter. Die reflektierte Wellenlänge ändert sich, und somit verschiebt sich der Peak im Spektrum. Daraus lässt sich nun die Dehnung berechnen und damit die Belastung des Kabels. Zur Attraktivität des faseroptischen Messsystems gehören unter anderem:

- Eine Faser kann eine Vielzahl von aktiven Stellen enthalten.

- Die Fasern sind gegenüber elektrischen und magnetischen Störungen immun.
- Die Form und die kleinen Abmessungen der Sensoren und der Zuleitung können je nach Anwendung vorteilhaft sein.
- Lange Zuleitungen haben keinen Einfluss auf das Messresultat.

Mit der Anwendung faseroptischer Sensoren an der Storchbrücke soll die Einsatzfähigkeit dieses neuartigen Messsystems im Feld demonstriert werden. Da auch die Zuverlässigkeit der Messresultate nachgewiesen werden muss, dient die Mehrheit der Sensoren der Selbstkontrolle. Bragg-Gitter wurden mit und ohne Vorspannung auf unbelastete CFK-Drähte (Dummies) aufgeklebt und ins Kabel eingebaut. Somit unterliegen die Dummies dem gleichen Alterungsprozess wie die aktiven Sensoren. Aus der zeitlichen Entwicklung der Messresultate der Dummies kann auf die Zuverlässigkeit geschlossen werden. Mit dem System wird seit mehr als fünf Monaten gemessen. Während dieser Zeit wurde kein Spannungsabbau festgestellt, und das faseroptische Sensorsystem funktioniert zuverlässig.

Die Daten werden mit einer einstellbaren Abtastrate automatisch in einem Datenlogger gespeichert. Es ist so möglich, in einer Auswertung differenzierte Aussagen über die Betriebsverhältnisse sowohl während eines Tageszyklus (Einfluss des Verkehrs) oder auch Schwankungen während eines Jahres (Einfluss der Jahreszeiten bzw. der Temperatur) zu erfassen.

Literatur

[1]
Hamilton III, H.R., Breen, J.E. and Nasser I. Al-Rasbi: Stay Cable Survey, February 15, 1995, Phil M. Ferguson Structural Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Bureau of Engineering Research, The University of Texas at Austin, USA, 1995

[2]
Meier U., Müller R. und Puck A.: GFK-Biegeträger unter quasistatischer und schwingender Beanspruchung, Vorabdruck der 18. Öffentlichen Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Verstärkte Kunststoffe e.V., Internationale Tagung über verstärkte Kunststoffe, Freudenstadt 5. bis 7. Oktober 1982, S. 35-1 bis 35-7

[3]
Meier U.: Schräg- und Hängerkabel aus kohlenstofffaserverstärkten Epoxidharzen: Stand der Entwicklung, Festschrift Prof. Dr. Hugo Bachmann zum 60. Geburtstag, IBK-Bericht No. SP-004, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, September 1995, S. 77-82

[4]
Meier U.: Carbon Fiber-Reinforced Polymers: Modern Materials in Bridge Engineering, Structural Engineering International, 1/ 1992, page 12

Die Empa dankt folgenden Firmen und Institutionen für ihre wertvolle ideelle und/oder materielle Unterstützung. Die ausgezeichnete Zusammenarbeit mit der Empa hat zum Gelingen dieses Projekts beigetragen.

- Bureau BBR Ltd., Zürich
- Bundesamt für Strassenbau, Bern
- Ciba AG, Basel
- Höltschi & Schurter AG, Dipl. Ing. ETH/SIA, Zürich
- KTI, Kommission für Technologie und Innovation (vormals KWF), Bern
- Stadt Winterthur, Tiefbauamt, Winterthur
- Stesalit AG, Zullwil
- StahlTon AG, Zürich
- Winterthur Versicherungen, Winterthur

Adresse der Verfasser:

Heinz Meier, Dipl. Maschinening. HTL, Prof. Urs Meier, Dipl. Bauing. ETH, Direktor, Rolf Brünemann, Dr. sc. nat., Empa Dübendorf, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf